

Nikolina Vidonis, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.

Hrvoje Vukašinović, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.

Marko Žugčić, univ. bacc. ing. geod. et geoinf.

► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: nividonis@geof.hr

► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: hvukasinovic@geof.hr

► diplomski studij, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, e-mail: mzugcic@geof.hr

# StarFire SBAS – uspostava, korištenje, performanse, perspektive

**SAŽETAK:** StarFire je na satelitima zasnovan poboljšani sustav (eng. *Satellite-based augmentation system - SBAS*) koji je razvio NavCom, tvrtka kćer kompanije John Deere koja se bavi proizvodnjom poljoprivrednih strojeva. Glavna zadaća mu je pružanje usluge pozicioniranja Precise Point Positioning (PPP) metodom sa subdecimetarskom točnošću na globalnoj razini. Uspostava sustava vrlo je dobro osmišljena i provedena, a većinu poslova odradili su NavComovi stručnjaci. Kada govorimo o performansama, iako su zahtjevi postavljeni vrlo visoko, proizvođači tvrde kako su ih dosegli. Postignuta je i velika dostupnost signala te pouzdanost dobivenih vrijednosti mjerenja. Uključenje GLONASS-a dodatno je poboljšalo sustav. Izvor problema dobrim rezultatima mogu biti velike sjene i loša konfiguracija terena. Proizvođači se nadaju kako će Galileo, QZSS, Compass i IRNSS kada postanu potpuno operabilni dodatno poboljšati sustav. Isto tako nadaju se kako će im napredak PPP metode također poboljšati performanse sustava.

**KLJUČNE RIJEČI:** StarFire, PPP, precizna poljoprivreda, SBAS, WADGPS, subdecimetarska točnost

## StarFire SBAS – establishment, use, performance, perspectives

**ABSTRACT:** StarFire is a satellite-based augmentation system (SBAS) developed by NavCom, a John Deere subsidiary company, which produces agricultural equipment. The main task of StarFire is to provide positioning service with Precise Point Positioning (PPP) method, with global sub-decimeter accuracy. The system is very well designed and implemented and most of the work was done by NavCom's experts. When we talk about performance, although the requirements had been set very high, the manufacturers claim that they reached them. Also, a great availability of the signal and reliability of obtained measurements is achieved. Including GLONASS improved these achievements even more. Giant shadows and poor terrain configuration can still present a problem in obtaining good results. The producers hope that Galileo, QZSS, Compass and IRNSS will further improve the system when they become fully operable. Also, they hope that the progress of the PPP method will also improve system performance.

**KEYWORDS:** StarFire, PPP, precision agriculture, SBAS, WADGPS, sub-decimeter accuracy

## 1. UVOD

Na satelitima zasnovani poboljšani sustavi (engl. *Satellite-based Augmentation System – SBAS*) su sustavi koji uz GNSS satelite koriste i geostacionarne satelite te tako osiguravaju dodatna mjerenja udaljenosti, integritet i poboljšanje točnosti. Geostacionarni sateliti emitiraju informacije za poboljšanje sustava (Bačić, 2013).

John Deere je tvrtka koja se bavi proizvodnjom poljoprivrednih strojeva. Ideja o sustavu StarFire nastala je 1994. godine. U to su doba konkurentske tvrtke već imale razvijene sustave za kartiranje polja. Unatoč dobroj ideji kartiranja polja, ona nije našla široku primjenu, te su iz tog razloga tvrtke počele propadati. Zbog toga se tvrtka John Deere okrenula preciznoj poljoprivredi. Namjera tvrtke je bila izraditi sustav koji će automatski voditi poljoprivredne strojeve po polju. U tu su svrhu stvorili i vlastiti sustav diferencijalnog GPS-a koji stvara korekcije za svaki satelit, a ne za svaku referentnu stanicu. Tako su stvorili prvu globalnu DGPS mrežu koja je mogla odrediti položaj točke s točnosti unutar inča (1 in=2,54 cm). Isto tako, počeli su sami proizvoditi svoje prijaimnike. Nakon rješenja svih problema, 1998. su prvi put ponudili na satelitima zasnovan DGPS s točnošću 1 – 2 metra. Do 2004. točnost je narasla na 10 centimetara i nastavlja rasti (Brimeyer, 2004).

## 2. USPOSTAVA

StarFire je globalni na satelitima zasnovani poboljšani sustav koji pruža globalni servis preciznog pozicioniranja točke (eng. *Precise Point Positioning – PPP*) za potrebe precizne poljoprivrede (Sharpe i dr., 2000).

Osnovni koncept rada sustava StarFire sličan je drugim DGPS sustavima koji pokrivaju velika područja (eng. *wide-area DGPS*), kao npr. Wide Area Augmentation System (WAAS) koji je razvila Federal Aviation Administration (FAA) (Sharpe i dr., 2000).

Sustav se sastoji od referentnih stanica za praćenje satelita, centara za obradu podataka, geostacionarnih satelita te korisničkih prijaimnika. Svaka stanica za praćenje prima dvofrekventne signale svih vidljivih satelita te ih, zajedno s podacima o integritetu sustava, šalje dvama kontrolnim središtima. Oba kontrolna središta primaju sve opažane podatke, kombiniraju ih i stvaraju jedinstven skup korekcija. Korekcije se šalju geostacionarnim satelitima odakle se šalju korisnicima (Sharpe i dr., 2000).

Iako je konceptualni model sličan drugim WADGPS sustavima, StarFire se ipak razlikuje od njih po tome što koristi iste dvofrekventne prijaimnike za kontrolne stanice i korisničke prijaimnike. Jeftin, kompaktan, dvofrekventni GPS prijaimnik visokih performansi – NCT2000D koji je razvila NavCom Technology Inc. taj je pristup učinio mogućim i praktičnim (Sharpe i dr., 2000).

StarFire sustav se sastoji od četiri segmenta, zemaljskog, kontrolnog, svemirskog i korisničkog. Svaki će biti objašnjen u idućim potpoglavljima.

### 2.1. ZEMALJSKI SEGMENT

Zemaljski segment sastoji se od preko 50 referentnih stanica za konstantno praćenje GPS i GLONASS satelita. Stanice su ras-

poređene širom svijeta. Sve stanice za praćenje imaju identičnu opremu koja uključuje (Sharpe i dr., 2000):

- dva redundantna NavComova NCT2000D GPS referentna prijamnika koji šalju dvofrekventna opažanja svih vidljivih satelita prema obama centrima za obradu podataka
- StarFire korisničku jedinicu koja služi kao neovisni opažački prijamnik
- opremu za komunikaciju (ruteri, ISDN modemi)
- jedinicu za daljinsko upravljanje napajanjem
- UPS modul.

Korisnička jedinica koja se nalazi na svakoj referentnoj stanici zove se stanica za nadgledanje i radi samostalno. Prima StarFire korekcije odaslane od komunikacijskih geostacionarnih satelita pomoću kojih određuje svoj položaj te ga prijavljuje centrima za obradu podataka (Sharpe i dr., 2000).

## 2.2. KONTROLNI SEGMENT

Kontrolni segment StarFire mreže sastoji se od dva centra za obradu podataka koji se nalaze u Torranceu (California) i Molineu (Illinois). Svaki centar računa sve korekcije i šalje ih satelitima. Računaju se korekcije orbite (emitirane svake sekunde) i korekcije sata (emitirane svake dvije sekunde) (Hatch, 2011).

### 2.2.1 Wide Area Correction Transform (WCT)

Wide Area Correction Transform je algoritam koji se koristi u centrima za obradu podataka i pomoću kojega se dobivaju StarFire WADGPS korekcije (Sharpe i dr., 2000).

Ulazni podaci koje koristi su (Sharpe i dr., 2000):

- dvofrekventna opažanja (C/A kodne pseudoudaljenosti, L1 noseća faza, P2 kodne pseudoudaljenosti i L2 noseća faza) svih GPS satelita koje prate referentne stanice za praćenje s ratom isporuke 1 Hz u realnom vremenu
- odaslane efemeride snimljene od strane referentnih stanica za praćenje koje su dostupne u realnom vremenu
- konfiguracijska datoteka u kojoj su definirane precizne lokacije ( $\pm 2$  cm) za svaku antenu referentne stanice određenu iz mrežnih rješenja temeljenih na IGS svjetskoj kontrolnoj mreži.

Dvofrekventna opažanja koriste se za tvorbu zaglađenih i za refrakciju popraavljenih pseudoudaljenosti koje su oslobođene ionosferske pogreške te virtualno slobodne od *multipatha*. One se nakon toga normaliziraju u odnosu na prijamnikov pomak sata i model troposfere za to područje. Konačno, normalizirane pseudoudaljenosti se težinski kombiniraju i tako tvore jedinstvenu korekciju pseudoudaljenosti za pojedini satelit. Sličan proces se provodi koristeći konačne razlike nosećih faza. Skup svih korekcija za sve vidljive satelite binarnom se porukom šalje u jedinicu za slanje podataka odakle se šalju geostacionarnim komunikacijskim satelitima (Sharpe i dr., 2000).

Pošto WCT koristi od refrakcija popravljene pseudoudaljenosti, dobivene WADGPS korekcije su oslobođene pogrešaka uzrokovanih prostornom dekorelacijom ionosferskog pomaka koji je svojstven jednofrekventnim korekcijama. Kada se koriste dvofrekventni mobilni prijamnici koji koriste iste tehnike korekcija refrakcije, jedinstven skup korekcija može se koristiti na cijelom kontinentalnom području s ujednačenom visokom točnošću (Sharpe i dr., 2000).

Dvije glavne prednosti proizlaze iz jednog konsolidiranog skupa korekcija za cijelo područje pružanja usluga (Sharpe i dr., 2000).

- Smanjena je širina područja potrebna na geostacionarnim komunikacijskim satelitima što dovodi do znatnih ušteda s obzirom na to da je cijena iznajmljenih kanala satelita proporcionalna potrebnoj snazi odašiljanja koja je proporcionalna potrebnoj širini područja.
- Algoritam za određivanje korekcija, uključujući i računanje

krajnjih težina, izvodi se u centralnom postrojenju (koje je dio centra za obradu podataka), a ne pomoću korisničke opreme na temelju modela ovisnih o lokaciji. To omogućava poboljšanja i nadogradnje WCT algoritma bez potrebe provođenja promjena algoritama u korisničkoj opremi.

## 2.3. SVEMIRSKI SEGMENT

Svemirski segment sastoji se od šest Inmarsat geostacionarnih komunikacijskih satelita koji primaju korekcijske poruke od centara za obradu podataka i emitiraju ih korisničkim prijamnicima. Svi korisnici StarFirea primaju podatke s dvaju geostacionarnih satelita, što znači da imaju redundantne podatke (Hatch, 2011).

Položaji geostacionarnih komunikacijskih satelita:

- Laureantides, Kanada
- Santa Paula, Kalifornija, SAD
- Burum, Nizozemska
- Southbury, Connecticut, SAD
- Perth, Australija
- Auckland, Novi Zeland.

## 2.4. KORISNIČKI SEGMENT

StarFire korisnička osnova sastoji se od sljedećih glavnih sastavnica (Sharpe i dr., 2000):

- multifunkcionalnog antenskog sklopa koji može primiti L1 i L2 GPS frekvencije kao i Inmarsat frekvenzijsko područje. Ova antena je dizajnirana da bude relativno konstantna pri nižim elevacijskim kutovima, što je dobro pri korištenju na većim geodetskim širinama gdje su komunikacijski geostacionarni sateliti na nižim elevacijskim kutevima.
- L-band prijamnika razvijenog tako da može primiti, pratiti i pretvoriti StarFire podatke odaslane s geostacionarnih komunikacijskih satelita.
- dvofrekventnog GPS modula koji je dizajnirao i proizveo NavCom. Uz ove sastavnice, tu su još i utori za povezivanje s računalom i napajanjem, baterija, memorija i dr.

## 3. KORIŠTENJE

### 3.1. POLJOPRIVREDA

Jedno od područja u kojem korisnici upotrebljavaju StarFire je i precizna poljoprivreda. StarFire im omogućava prednosti koje uključuju minimalno preklapanje između paralelnih brazdi, mogućnost rada noću i sl. (Dixon, 2006)

#### 3.1.1 Kartiranje polja

StarFire se koristi u različitim poljoprivrednim zadacima kao što je kartiranje polja, pomoć pri upravljanju vozilom, automatsko upravljanje vozilom i dr.

2000. godine najkorištenija funkcija StarFirea bila je kartiranje polja. Kod ovog korištenja sustav za precizno pozicioniranje u realnom vremenu postavi se na kombajn te se istovremeno spremaju podaci o položaju s podacima primljenih sa senzora za žetvu koji mjere količinu usjeva. Nakon što je pređeno cijelo polje, prikupljeni podaci se učitavaju u računalo te se pomoću njih izrađuje tematska karta koja sadrži statističke podatke o upravo provedenoj žetvi sa žitom kao funkcijom položaja (Sharpe i dr., 2000).

#### 3.1.2 Pomoć pri upravljanju vozilom

Pomoć pri upravljanju vozilom provodi se tako da se na zaslonu uređaja vozaču prikazuje trenutno odstupanje vozila od zadane rute. Vozač zatim sam kontrolira vozilo kako bi minimizirao prikazano odstupanje (Sharpe i dr., 2000).

#### 3.1.3 Automatsko upravljanje vozilom

Kod automatskog upravljanja vozilom, vozilo se usmjerava kako bi pratilo planiranu putanju pomoću kontrolnog sustava koji se sastoji od senzora za pozicioniranje, kontrolnog algoritma elektrohi-

drauiličkih ili elektromehaničkih kontrola za upravljanje vozilom te senzora koji šalju povratne informacije. Vozač može preuzeti ručno upravljanje vozilom kako bi zaokrenuo ili izveo neplanirane radnje, ali ponavljajuće radnje i praćenje redova provodi se automatski (Sharpe i dr., 2000).

### 3.2. DALJE OD OBALE (OFFSHORE)

Sve više cijene energije guraju istraživanje ulja i plina sve dalje od obale. Precizno pozicioniranje na decimetarskoj razini je do sada bilo nedostupno daleko od obale. Preciznost StarFirea na globalnoj razini poboljšava seizmička istraživanja i određivanje lokacije raznih podvodnih struktura. Zbog čestih jakih uragana na području SAD-a, postavljeni su vrlo visoki zahtjevi pozicioniranja da bi se osigurala sigurnost posada koje spašavaju oštećene platforme tako što će izbjeći podvodne cijevi izvučene s morskog dna (Dixon, 2006).

### 3.3. IZMJERA ZEMLJIŠTA

Geodeti su primijetili prednosti fleksibilnosti StarFire prijmnika u područjima u kojima RTK nije dostupan i u kojima je problematičan ili preskup za primjenu. Decimetarska točnost je dovoljna za mnoge zadatke izmjere i kartiranja. StarFire nudi uslugu StarFire RTK Extended koja omogućava održavanje RTK točnosti kada se RTK baza privremeno izgubi, te tako štedi vrijeme (Dixon, 2006).

### 3.4. ZRAČNA IZMJERA

Digitalna fotogrametrija i LIDAR (eng. *Light Detection and Ranging*) se puno koriste jer je cijena u skladu sa zadatkom izmjere velikih područja, posebno dugih linijskih projekata. Tradicionalno, to bi značilo određivanje mnoštva GNSS orijentacijskih točaka na zemlji te naknadnu obradu podataka. To povećava i cijenu i vrijeme potrebno da se izvrši zadatak. Imati StarFire decimetarsku točnost u realnom vremenu znači izbjeći skupo postavljanje GNSS orijentacijskih točaka, te tako ubrzati izradu projekta (Dixon, 2006).

## 4. PERFORMANSE

Od same uspostave StarFire se predstavljao kao globalni SBAS koji postiže subdecimetarsku točnost pozicioniranja. Povijesni pregled performansi, kao i sadašnje mogućnosti, opisane su u poglavljima koja slijede.

### 4.1. PROKLAMIRANE PERFORMANSE (INTERNA ISTRAŽIVANJA)

Svi predstavljeni podaci u ovom poglavlju preuzeti su iz publikacija koje je izdao sam NavCom, a metode i uvjeti u kojima su došli do njih nisu nam poznati.

#### 4.1.1 Povijesni pregled

Prvi dostupni podaci o točnosti pozicioniranja pomoću StarFire korekcija sežu u kolovoz „daleke“ 2000. godine kada su provedena testiranja na jednoj NavComovoj kontrolnoj postaji. 24-satnim testom točnosti pozicioniranja (1-sigma) došli su do sljedećih vrijednosti st. devijacije: E = 0,14 m, N = 0,19 m i h = 0,41 m. Iz prethodno opisanog testiranja izdvojen je jednosatni interval čija je točnost iznosila: E = 0,04 m, N = 0,05 m i h = 0,12 m (Sharpe i dr., 2000).

Prvi značajan iskorak u povećanju točnosti učinjen je implementacijom Real-Time GIPSY (RTG) sustava 2002. godine. RTG je NASA-in softver koji je razvio JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) za predviđanje orbite i sata satelita kako bi se odredile korekcije za poboljšano pozicioniranje u realnom vremenu (*Jet Propulsion Laboratory*, 2002). Pri određivanju pozicije, osim mjerenja na NavComovim referentnim postajama, ulazila su i mjerenja s JPL-ovih referentnih postaja što je dogovoreno između prethodno navedenih kompanija (Sharpe i dr., 2002).

18. rujna 2002. godine provedena su 24-satna testiranja točnosti (1-sigma) na referentnim stanicama u Australiji i SAD-u. Standardna devijacija za postaju u Australiji iznosila je: E = 0,04 m, N = 0,05 m i

h = 0,13 m, a na referentnoj postaji u SAD-u: E = 0,03 m, N = 0,07 m i h = 0,11 m (Hatch i dr., 2000).

Najnovije poboljšanje točnosti StarFirea dogodilo se nedavno kada su GLONASS sateliti uključeni u rješenje pozicije prijmnika i to predstavlja današnje performanse sustava. One će biti prikazane u sljedećem odlomku.

#### 4.1.2 Orbita i sat satelita

Kako bi postigli veću točnost pozicioniranja NavComovi stručnjaci razvili su novi navigacijski softver za predviđanje orbite i sata satelita. Za razliku od NASA-inog RTG-a, novi NavComov softver u rješenju pozicije koristi i GLONASS satelite, a prilagođen je i Galileo te BeiDou satelitima kada ti sustavi postanu operativni. Iz NavComa tvrde da taj softver određuje orbitu GPS satelita s točnošću od 5 cm i 14 cm za GLONASS satelite (1-sigma).

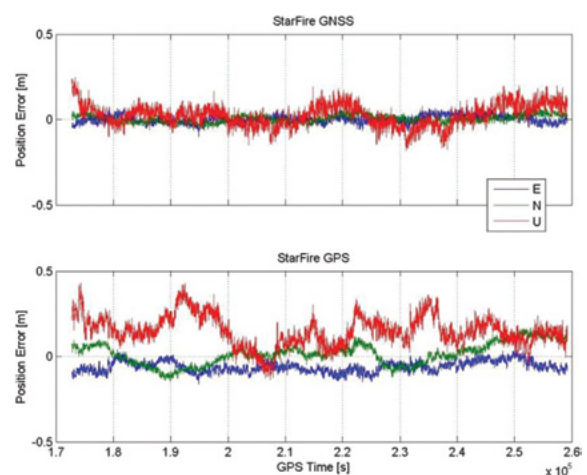
Ta tvrdnja je pokazana 24-satnim testom točnosti orbite koji je proveden mjerenjem za 29 GPS i 17 GLONASS satelita te uspoređen s IGS-ovim podacima koji su uzeti kao referentni. Prosječna točnost orbite za GPS satelite iznosila je 3,96 cm, a za GLONASS satelite 8,69 cm. Usporedbe radi, stari StarFireov sustav koji je koristio samo GPS satelite (U daljnjem tekstu: StarFire GPS) imao je točnost određivanja orbite 17 cm (Wang i dr., 2012).

#### 4.1.3 Test pod otvorenim nebom

Performanse novog StarFire sustava koji koristi GPS i GLONASS satelite (U daljnjem tekstu: StarFire GNSS) konstantno se prate na svim novim referentnim postajama. Radi usporedbe starog i novog StarFire sustava, kao i zbog prikaza performansi novog sustava, u daljnjem tekstu će biti pokazano mjerenje na NavComovoj referentnoj postaji Torrance, Kalifornija.

Mjerenja su obavljena s dva prijmnika, StarFire GPS i GNSS, koji su bili priključeni na istu antenu pod otvorenim nebom. Mjerenja s istom antenom omogućila su testiranja u jednakim uvjetima, odnosno oba su prijmnika bila izložena istom *multipathu*. Standardne devijacije za StarFire GPS iznose: E = 6,57 cm, N = 6,80 cm i h = 17,44 cm dok su za StarFire GNSS bolje te iznose: E = 2,16 cm, N = 2,22 cm i h = 6,78 cm (1-sigma). Sve dobivene vrijednosti standardnih devijacija tokom 24-satnog mjerenja za obje konfiguracije prikazane su na slici 1.

Dobar pokazatelj poboljšanja točnosti pozicioniranja je i PDOP (*Position Dilution of Precision*) koji je za StarFire GNSS konfiguraciju tokom cijelog 24-satnog testa ostao ispod dva, dok je kod



Slika 1. – 24-satni test točnosti pozicioniranja; st. devijacije po koordinatnim osima (Wang i dr., 2012)

StarFire GPS-a povremeno prelazio preko pet (Wang i dr., 2012).

#### 4.1.4 Test u sjeni

Tijekom ovog testa sjena je bila prevelika, te se u svim pokušajima izgubio prijam signala s minimalnog broja satelita potrebnih za određivanje pozicije. Oba su sustava (StarFire GPS i GNSS) u ovakvim



uvjetima imala problema sa smanjenom točnošću, ali se StarFire GNSS brže „oporavljao“ zbog većeg broja dostupnih satelita.

StarFire-ovi stručnjaci tvrde kako je vrijeme potrebno za postizanje iste točnosti kod StarFire GNSS-a u odnosu na StarFire GPS otprilike dvostruko manje (Wang i dr., 2012).

4.2. NEOVISNA ISTRAŽIVANJA (EKSTERNA KONTROLA)

Cijelo ovo poglavlje (4. 2.) temelji se na istraživanju koje je provedeno u Japanu na Sveučilištu u Tsukubi (Morales i dr., 2007).

4.2.1 Uvod

Istraživanje je provedeno 26. ožujka 2007. godine na parkiralištu prethodno spomenutog sveučilišta. Na slici 2. (sredina), preuzetoj s Google Earth aplikacije, prikazana je približna putanja kojom se kretala robotska platforma „Yamabico“ (Slika 2., desno) s pričvršćenim GPS uređajima koji su testirani.



Slika 2. – Sjenoviti dio putanje (lijevo), skica putanje (sredina), „Yamabico“ (desno) (Morales i dr., 2007)

Dio putanje od točke A do B i od C do A pod otvorenim je nebom dok je dio od B do C u sjeni drveća što je također prikazano na slici 2. (lijevo). Putanja je izmjerena Trimble 5700 RTK-GPS prijamnikom u fiksnom rješenju s točnošću unutar 2 cm te je uzeta za referencu prema kojoj su rađena ispitivanja na ostalim prijamnicima. Sa svakom prijamničkom konfiguracijom eksperiment je rađen deset puta u različito vrijeme, što je uzrokovalo različitu geometriju satelita. Podaci o pozicioniranju, standardnim devijacijama te DOP vrijednostima preuzeti su iz izlaznog izvješća NMEA 0183 (u daljnjem tekstu: NMEA output) koje je preuzeto od svakog prijamnika.

4.2.2 Konfiguracije prijamnika

U ovom radu testirano je sedam različitih konfiguracija čiji opis slijedi:

1. Jednofrekventni kodni DGPS (Trimble DSM 12/212 DGPS)
2. Dvofrekventni kodni DGPS (NavCom SF-2050M s CSI-Wireless SBA-I Beacon prijamnikom)
3. RTK-GPS s prijamom RTCM korekcija pomoću mobilne telefonije (Trimble 5700 RTK)
4. RTK-GPS s prijamom korekcija u RTCM formatu pomoću *wirelessa* (NavCom SF-2050M prijamnik s prijamom korekcija od baznog uređaja Trimble 5700 RTK)
5. StarFire WADGPS (NavCom prijamnik SF-2050M sa StarFire diferencijalnim popravcima)
6. StarFire-DGPS dual mod (SF-2050M prijamnik sa spojenim StarFire i CSI-Wireless SBA-I Beacon korekcijama)
7. RTK-GPS StarFire dual mod (SF-2050M prijamnik sa spojenim korekcijama dobivenim iz StarFire-a i Trimble 5700-RTK bazne stanice).

Iako je jedino peta predstavljena konfiguracija poboljšana samo sa StarFire korekcijama, zadržali smo i ostale zbog mogućih zanimljivih podataka, ali i zbog cjelovitosti istraživanja. Iz citiranog teksta nismo mogli zaključiti kakve su to korekcije primali „beacon“ prijamnici te ne možemo o njima više govoriti.

4.2.3 Indeksi procjene i rezultati istraživanja

Kako bi se procijenile i usporedile performanse korištenih konfigu-

racija, evaluirana su sljedeća četiri parametra:

- Postotak dostupnosti mjerenja
- Preciznost mjerenja
- Postotak pouzdanosti mjerenja
- Vrijeme oporavka.

Nakon objašnjenja indeksa procjene slijede tablice u kojima su prikazani prosječni rezultati elemenata evaluacije kroz deset ponavljanja za svaku konfiguraciju.

Dostupnost

Prema postavkama GPS uređaja pozicioniranje se izvršava svake sekunde (1 Hz). Međutim, zbog nedovoljnog broja satelita ili nedostupnosti prijama korekcija, ponekad se ne može dobiti output, a samim time se ne može odrediti ni fiksno rješenje pri kojem su dodijeljene vrijednosti standardne devijacije. U ovom eksperimentu, kako bi se odredio postupak dostupnosti, broj takvih fiksnih rješenja označen je s  $N_{DR}$ . Budući da je poznato vrijeme trajanja eksperimenta  $N_{DE}$ , postotak dostupnosti dobiven je omjerom koji slijedi, a rezultati tog istraživanja nalaze se u tablici 1.:

$$Dostupnost\% = \frac{N_{DR}}{N_{DE}} \cdot 100$$

Tablica 1. – Rezultati ispitivanja dostupnosti (Morales i dr., 2007)

GPS konfiguracija	Dostupnost (%)	
	Otvoreno nebo	Sjena drveća
1) Trimble DGPS	99,93	99,18
2) NavCom DGPS	99,06	96,92
3) Trimble RTK	99,12	91,21
4) NavCom RTK	99,08	90,18
5) StarFire	99,04	81,05
6) StarFire DGPS	99,04	94,66
7) StarFire RTK	99,05	91,39

Preciznost

Usporedba preciznosti odrađena je pomoću HDOP parametara i aritmetičke sredine  $\sigma_H$  koja je dobivena iz sljedećeg izraza:

$$\sigma_H = \frac{\sum_{i=1}^{N_{DR}} \sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2}}{N_{DR}}$$

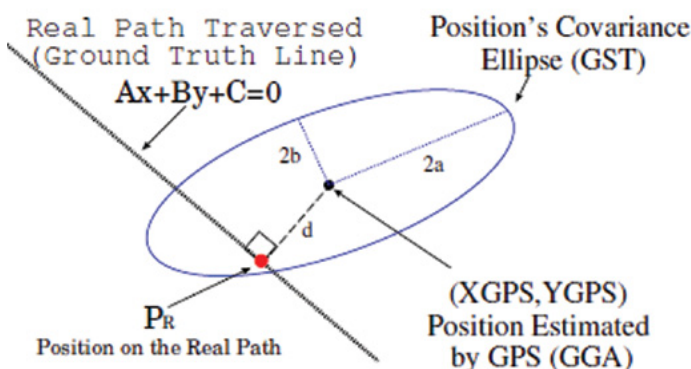
pri čemu su  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$  standardne devijacije po horizontalnim osima, a one su zajedno s HDOP-om dobivene iz NMEA outputa.  $N_{DR}$ , kao i u prethodnom indeksu procjene, predstavlja broj fiksnih rješenja. Rezultati testa preciznosti nalaze se u tablici 2.

Tablica 2. – Rezultati ispitivanja preciznosti (Morales i dr., 2007)

GPS konfiguracija	Otvoreno nebo		Sjena drveća	
	Preciznost	HDOP	Preciznost	HDOP
1) Trimble DGPS	1,39	0,93	1,46	0,93
2) NavCom DGPS	1,95	1,50	1,83	2,31
3) Trimble RTK	1,27	1,12	9,44	4,66
4) NavCom RTK	0,07	1,19	3,49	2,05
5) StarFire	1,66	1,40	9,15	3,35
6) StarFire DGPS	1,94	1,49	3,23	2,33
7) StarFire RTK	0,19	1,28	6,21	2,66

### Pouzdanost

Indeks pouzdanosti određivan je samo za dio putanje u sjeni drveća. Tijekom eksperimenta mjerene su pozicije prijarnika  $X_{GPS}$  i  $Y_{GPS}$ . Te vrijednosti, kao i vrijednosti standardne devijacije te elementi elipse pogrešaka (poluosi elipse  $a$  i  $b$  te kut rotacije), dobiveni su iz NMEA outputa. Kako bi se proveo test pouzdanosti prvo je iskorištena okomita udaljenost od točke mjerene GPS-om do prave putanje te je dobivena točka sjecišta  $P_R$  za koju je pretpostavljeno da je prava točka na liniji putanje. Ako takva točka zadovoljava uvjet od 95% točnosti ( $2\sigma$ ) smatra se pouzdanom i ulazi u izračun postotka pouzdanosti. Zadovoljava li točka  $P_R$  taj uvjet, odnosno nalazi li se ta točka unutar elipse s dvostrukim vrijednostima poluosi ( $2\sigma$ ), ispitano je pomoću dvije standardne devijacije, što je detaljnije prikazano na slici 3.



Slika 3. – Shematski prikaz vrednovanja parametra pouzdanosti (Morales i dr., 2007)

Sam postotak pouzdanosti izražen je omjerom broja pouzdanih točaka  $NR_E$  ( $P$  točke koje se nalaze unutar elipse  $2\sigma$ ) i broja primljenih točaka  $NDR$ , a izračunava se po sljedećoj formuli:

$$Pouzdanost(\%) = \frac{NR_E}{N_{DR}} \cdot 100$$

Rezultati navedenog istraživanja prikazani u tablici 3.

Tablica 3. – Rezultati ispitivanja pouzdanosti (Morales i dr., 2007)

GPS konfiguracija	Pouzdanost (%)	
	Svi podaci	„Precizni“ podaci
1) Trimble DGPS	100,00	100,00
2) NavCom DGPS	83,63	93,82
3) Trimble RTK	91,82	92,36
4) NavCom RTK	87,67	88,82
5) StarFire	82,89	93,99
6) StarFire DGPS	83,92	92,45
7) StarFire RTK	81,46	84,94

### Vrijeme oporavka

Vrijeme oporavka je vrijeme potrebno za ponovno uspostavljanje pozicioniranja u fiksnom rješenju nakon gubitka istog. Rezultati istraživanja opisanog parametra prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. – Rezultati ispitivanja vremena oporavka (Morales i dr., 2007)

GPS konfiguracija	Vrijeme (sekunde)
1) Trimble DGPS	-
2) NavCom DGPS	80,88
3) Trimble RTK	125,60
4) NavCom RTK	9,90
5) StarFire	89,10
6) StarFire DGPS	85,60
7) StarFire RTK	13,55

## 5. PERSPEKTIVE

### 5.1. INTEGRACIJA GNSS SUSTAVA U STARFIRE SBAS SUSTAV

Razvoj i povećanje dostupnosti novih GPS frekvencija i kodova zahtjeva i napredak StarFire sustava. Jedno od ključnih unaprjeđenja je razvoj zemaljskog segmenta sustava koji će povećanjem broja lansiranih satelita moći preciznije određivati korekcije.

Integracija ostalih GNSS sustava kao što su GLONASS, Galileo, QZSS, Compass i IRNSS također zahtjeva promjenu u zemaljskom segmentu StarFire sustava. Podrška novih GNSS sustava zahtjeva dodavanje dodatnih orbita i satova sustavu za računanje korekcija, ali i dovodi do mogućnosti razvoja novih višefrekventnih prijarnika (Dixon, 2006).

### 5.2. NAPREDAK PERFORMANSI SUSTAVA

Kako bi StarFire bio što konkurentniji na tržištu NavCom povećava broj stanica za praćenje kojih je 2006. bilo 60, a danas ih je preko 80.

NavCom radi na poboljšanju performansi StarFire sustava u nekoliko područja (Sharpe i dr., 2000).

- Procjena pogrešaka orbita satelita je jedno od područja koje je u cijelom sustavu najviše opterećeno pogreškama i ako se one uspješno smanje, to mogao biti značajan napredak za sveukupnu točnost.
- Procjena nemodeliranih troposferskih pogrešaka na stajalištima.
- Navigacijski modovi koji koriste kinematičke tehnike sa *floating* ambigvitetima nosećih faza detaljnije će se istražiti.
- Širenje StarFire sustava u više regija bit će razmatrano kako se dostupnost globalnih L-band frekvencija povećava i kako se StarFire proširuje na tržišta izvan poljoprivrede.

### 5.3. PROŠIRENJE PODRUČJA PRIMJENE

Povećanje točnosti StarFire sustava logično je dovelo do širenja primjene te pružanja usluga i drugim zanimanjima, a ne samo poljoprivredi. Točnost sustava je dosegla toliku razinu da se počeo koristiti za:

- izmjeru zemljišta i GIS
- nadzor i kontrolu gradilišta
- pomorska snimanja i istraživanja resursa
- hidrografsko kartiranje
- praćenje prometa i transportiranja
- fotogrametriju i LIDAR
- geofizička i seizmička istraživanja
- automatizirano pristajanje brodova u lukama.

Neki NavComovi proizvodi pružaju dostupnost RTG i RTK u jednom proizvodu što je jako zanimljiva kombinaciju koja dopušta kori-

sniku da izabere bilo koju od te dvije visokoprecizne mogućnosti za svoje potrebe (Hatch i dr., 2000).

StarFire pri snimanju pod otvorenim nebom pokazuje zavidne rezultate, ali u blizini šumovitih područja dolazi do smanjenja točnosti, što je dovelo do dodatnih istraživanja kako bi se u navedenim područjima točnost podigla na razinu koja je inače dostupna.

Jedna grana istraživanja odnosi se i na korištenje sustava u raznim vremenskim prilikama.

#### 5.4. NAPREDAK PRECISE POINT POSITIONING (PPP) METODE

Kod PPP metode najviše se teži povećanju točnosti uz smanjenje vremena opažanja te se samim time puno radi na razvoju algoritama koji bi to pružili i razvoju hardvera kojim bi se to postiglo. Velik korak naprijed je Glonassovo postignuće pune operabilnosti čime se češće dobivaju podaci satova njihovih satelita (Geng i dr., 2013).

Značajniji napredak je postignut proizvodnjom trofrekventnih prijamnika koji su još u početnoj i testnoj fazi. Korištenjem trofrekventnih prijamnika može se smanjiti vrijeme opažanja, što je u postupku dokazivanja usporedbom dvofrekventnih i trofrekventnih prijamnika, i istovremeno povećati točnost samog opažanja. Jedan od mogućih problema navedenih prijamnika je taj što bi se trebalo poraditi na satovima satelita koji nisu prilagođeni višefrekventnim signalima (Geng i dr., 2013).

#### 6. RASPRAVA

StarFire se predstavlja kao globalni SBAS koji daje poziciju u realnom vremenu pomoću PPP metode sa subdecimetarskom točnošću. Izvrsno zvuči, ali opravdava li to i dalje, ne možemo reći. Za takvu analizu morali bismo provesti mnoga mjerenja tim sustavom, a do tada smo prisiljeni vjerovati proizvođačevim riječima i pokojoj vanjskoj publikaciji koje i nisu previše dostupne.

Prema iznesenim proizvođačevim istraživanjima StarFire postiže subdecimetarsku točnost po sve tri koordinatne osi. Takav rezultat postignut je uključanjem GLONASS-a i novim softverom za predikciju orbite i sata satelita iako je i prije toga StarFire postizao dobre rezultate. Tim poboljšanjem nije postignut pomak samo na polju točnosti, nego su još povećane dostupnost i pouzdanost. Kod StarFire GNSS-a zabilježen je izvrstan DOP tijekom cjelodnevnog istraživanja, dok je kod StarFire GPS-a on bio dobar (Person, 2008). Sve ove performanse poboljšane su i u zahtjevnim uvjetima signala, odnosno sada je moguće pozicioniranje na mnogim mjestima gdje to prije nije bio slučaj. Dodavanjem novih satelita također je smanjeno vrijeme za postizanje iste točnosti, a trend pokazuje da je ono duplo manje.

U neovisnom istraživanju na otvorenom nebu sve su konfiguracije imale izvrsnu dostupnost. Konfiguracija koja je primala samo StarFire popravke u testu horizontalne preciznosti ostvarila je rezultat od 1,66 m. Ako tu brojku razložimo po osima i pretpostavimo da su jednakog iznosa, dobili bismo točnost od oko 1 m. Bilo kako bilo, smatramo da je na globalnoj razini točnost dobra ili čak vrlo dobra. Treba još spomenuti kako su u zahtjevnim i sjenovitim uvjetima bolje rezultate imale „beacon“ konfiguracije.

#### 7. ZAKLJUČAK

Godine 1994. pokrenut projekt uspostave SBAS-a tvrtke John Deer iz SAD-a pod nazivom StarFire danas je dosegao operativnu razinu. Iako je cijena ulaganja bila visoka, tvrtka ovu aktivnost, kao podršku svojoj osnovnoj djelatnosti (proizvodnji poljoprivrednih strojeva i oruđa) uredno nadograđuje prepoznajući njezinu prednost. Tehnička strana StarFire projekta nije novina, osim činjenice da je John Deer prva privatna kompanija koja je

pokrenula i realizirala globalni SBAS projekt. Iako NavComov projekt nije unio inovaciju u svijet satelitskog pozicioniranja, svakako ju je unio u svijet precizne poljoprivrede.

Sustav se konstantno nadograđuje i unaprjeđuje (integracija GLONASS satelita, nova softverska rješenja). Svakim unaprjeđenjem povećava se točnost i pouzdanost sustava te se time i proširuje njegova primjena. Uz primarnu svrhu, preciznu poljoprivredu, StarFire sustav danas se koristi i u geodetske svrhe (terenska izmjera, izmjera iz zraka, hidrografska izmjera), za kontrolu gradilišta, praćenje prometa, geofizička i seizmička istraživanja i dr.

Prema specifikacijama proizvođača, njihov sustav postiže zapanjujuće rezultate, ali treba reći da ima malo neovisnih analiza koje navedene tvrdnje mogu potvrditi. StarFire je ispunio očekivanja u onolikoj mjeri koliko smo uspjeli saznati o njemu, ali isto tako stavio sumnju na onaj dio koji nismo saznali. Nakon toga postavlja se pitanje je li ispunio i očekivanja svojih tvoraca, ali odgovor nam nije poznat. Naposljetku će konačnu ocjenu dati sami korisnici.

#### LITERATURA

- › Bačić, Ž., (2013), Integrirani sustavi u geomatici, prezentacije s predavanja
- › Brimeyer, J., (2004), Nothing Runs Like a Precision Farming System, [Internet], <raspoloživo na: <http://www.progressiveengineer.com/pewebbackissues2005/peweb%2060%20mar05-2/Deere.htm>>, [pristupljeno 22. listopada 2013.]
- › Dixon, K., (2006), StarFire™: A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning, ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, September 26-29, 2006. Fort Worth TX
- › Geng, J. H., Bock, Y., (2013.), Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution, (sažetak), [Internet], <priključeno na: <https://scripps.ucsd.edu/biblio/triple-frequency-gps-precise-point-positioning-rapid-ambiguity-resolution>>, [pristupljeno 15. studenog 2013.]
- › Hatch, R., (2011.), The StarFire Global Satellite Based Augmentation System, [Internet] <raspoloživo na: <http://ow.ly/wcNk7>>, [pristupljeno 5. studenog 2013.]
- › Hatch, R., Sharpe, T., Galyean, P., (2000), A Global High Accuracy Differential GPS System, White paper
- › Jet Propulsion Laboratory (2002.), The Global Differential GPS Systems, [Internet] <raspoloživo na: <http://www.gdgps.net/system-desc/software.html>> [pristupljeno 20. studenog 2013.]
- › Morales, Y., Tsubouchi, T., (2007), GPS Moving Performance on Open Sky and Forested Paths, “, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 29 – November 2, 2007.
- › Person, J. (2008), Causes of Precision Error, [Internet] <raspoloživo na: <http://www.developerfusion.com/article/4652/writing-your-own-gps-applications-part-2/2/>>[pristupljeno 20. studenog 2013.]
- › Sharpe, T., Hatch, R., Nelson, F., (2000), John Deere's StarFire System: WADGPS for Precision Agriculture, White paper
- › Sharpe, T., Hatch, R., Nelson, F., (2002) StarFire and Real-Time GIPSY: A Global High-Accuracy Differential GPS System, White paper
- › Wang, C., Hatch, R., (2012), StarFire™ GNSS: The Next Generation StarFire Global Satellite Based Augmentation System, White paper